

Determining the Optimal Location of the Tower Crane in Building Projects Using Artificial Intelligence

Dr. Samah Makkieh *

(Received 14 / 4 / 2022. Accepted 9 / 6 / 2022)

□ ABSTRACT □

Tower cranes are one of the most important equipment used in building projects, their proper placement within the sites boundaries provides a positive impact on the time, operating cost, productivity and safety of work. Most of the Syrian contracting companies depend on the self-sense and previous experience of the engineers in locating the tower crane, which simply focuses on the possibility of the crane reaching all the supply and demand points, taking into account certain conditions related to the site. This experience does not help placing the crane in the optimal position, Therefore, this research suggests taking advantage of artificial intelligence techniques, especially the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to place the crane in the optimal location.

The new building, Faculty of Dentistry at Tishreen University was chosen as a case study in this research, where the Liebherr 63 LC crane was used on site. The building site boundaries, permanent elements, supply and demand points were modeled within the Revit BIM environment, the crane travel time equations were found as an objective function, and entered to the particle swarm algorithm that was coded in python within Dynamo to reduce objective function's value in order to find the optimal location of the crane.

The results of the proposed algorithm gave accurate 3D coordinates for the optimal position of the crane, reducing the crane travel time by approximately 29% compared to the actual location of the used crane.

Keywords: site layout, tower cranes, BIM, particle swarm optimization algorithm (PSO).

* Assistant professor, Construction Engineering And Management Department, Faculty of civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria, S.makkieh@tishreen.edu.sy.

تحديد الموقع الأمثل للرافعة البرجية في مشاريع الأبنية باستخدام الذكاء الصناعي

د. سماح مكيه*

(تاريخ الإيداع 14 / 4 / 2022. قُبِلَ للنشر في 9 / 6 / 2022)

□ ملخص □

تعتبر الرافعات البرجية أحد أهم المعدات المستخدمة في مشاريع الأبنية، ويوفر تموضعها السليم ضمن حدود موقع البناء تأثيراً إيجابياً على زمن وتكلفة تشغيلها وعلى إنتاجية وسلامة العمل في الموقع. تعتمد غالبية شركات المقاولات السورية على الحس الذاتي والخبرة السابقة للمهندسين في تحديد موقع الرافعة البرجية والتي تركز ببساطة على إمكانية وصول الرافعة إلى جميع نقاط التزويد والتفريغ مع مراعاة شروط معينة متعلقة بالموقع، ولا تفيد هذه الخبرة بوضع الرافعة في الموقع الأمثل لها، لذا يقترح هذا البحث الاستفادة من تقنيات الذكاء الاصطناعي ولا سيما خوارزمية أسراب الطيور Particle Swarm Optimization (PSO) لوضع الرافعة في الموقع الأمثل لها. تم اختيار مبنى كلية طب الأسنان الجديدة في جامعة تشرين كحالة دراسية في هذا البحث حيث استخدمت الرافعة في الموقع من نوع Liebherr 63 LC، تم نمذجة حدود موقع البناء والعناصر الدائمة ونقاط التزويد والتفريغ ضمن بيئة الـ Revit BIM ثم إيجاد معادلات زمن سفر الرافعة ومن ثم إدخالها إلى خوارزمية أسراب الطيور التي تم تكويدها بلغة الـ python ضمن الـ Dynamo كتابع هدف للتقليل من قيمتها بهدف إيجاد الموقع الأمثل للرافعة. أعطت نتائج الخوارزمية المقترحة إحداثيات 3D للموضع الأمثل للرافعة، خفّض زمن سفر الرافعة بنسبة 29% تقريباً مقارنة بالموقع الفعلي للرافعة المستخدمة.

الكلمات المفتاحية: تخطيط موقع البناء، الرافعات البرجية، BIM ، خوارزميات أسراب الطيور (PSO).

* مرسه - قسم هندسة وإدارة التشييد - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية S.makkieh@tishreen.edu.sy

مقدمة:

يعتبر التخطيط السليم لموقع التشييد إحدى المقومات الأساسية لنجاح المشروع الإنشائي وخاصة مشاريع البناء الكبيرة التي تتطلب خطماً دقيقة لكل من موارد التشييد المعروفة من اليد العاملة والآلات والمواد. لا يمكننا اليوم أن نغض النظر عن تجاهل غالبية مؤسسات التشييد السورية لمرحلة إعداد مخطط لمواقع البناء Construction site layout planning (CSLP) والتي تهدف إلى تحديد نوع وعدد وحجم ومكان توضع المرافق المؤقتة داخل حدود موقع البناء مع مراعاة العديد من العوامل أهمها: تصاميم ومواقع الهياكل الدائمة المراد بناؤها، وطبيعة المشروع، وظروف مكان موقع العمل، والمعدات المطلوبة أثناء التشييد، وتنظيم وتنسيق أعمال البناء المتضمنة. تعتبر مسألة إعداد مخطط لموقع الرافعة (TCLP) مسألة فرعية من مسائل (CSLP)، إذ تساعد الرافعات البرجية في نقل مجموعة كبيرة من الأحمال والمواد الضخمة والثقيلة عمودياً وأفقياً وإن اختيار الموقع الدقيق والمناسب لها يحقق وظيفتها؛ فهو يساعد في تغطيتها لجميع الأجزاء المطلوبة في المبنى وفي موقع التشييد، كما يساهم في تقليل الزمن والجهد المبذول أثناء مناولة المواد بين نقاط التزويد والتفريغ، وتقليل الكلف الناتجة عن نقل هذه المواد، وتقليل التأثيرات السلبية على البيئة المحيطة، ويضمن استمرارية العمل وزيادة الكفاءة الإنتاجية والأمن والسلامة في موقع المشروع. يتم تحديد موقع الرافعة البرجية في معظم مشاريعنا بالاعتماد على الآراء الشخصية للمهندسين والخبرات النابعة من المشاريع السابقة وبدون الاستعانة بأي منهجية علمية تساعد في إيجاد الموقع الأمثل للرافعة وتحقيق الإدارة السليمة لموقع التشييد. ومن هذا السياق كان لا بد من البحث والاستعانة بالتجارب السابقة للوصول إلى الحل الأمثل لموقع الرافعة، وقد قدمت العديد من الأبحاث الحديثة تقنيات غير تقليدية معتمدة على الذكاء الاصطناعي نذكر منها:

بيّن (Alkriz and Mangin 2005) أن تحديد المواقع المثلى للرافعات والمرافق يدوياً من قبل مهندسين ذوي خبرة أثناء مرحلتي تخطيط وتنظيم مشروع البناء تسبب مخاطر كبيرة وغالباً ما تكون مكلفة بالنسبة للمقاول وتعود لضعف المعرفة والعدد الهائل من المرافق المستخدمة والتداخلات المحتملة فيما بينها، لذا قدم الباحث نظام تحسين وأداة دعم قرار لتحديد الموقع الأمثل للرافعات والمرافق في مواقع البناء، اعتمدت هذه الأداة على النمذجة المكانية لموقع البناء وللعناصر المتواجدة ضمنه وعلى نمذجة تقنية التحسين القائمة على الخوارزميات الجينية (GA)، وتوصل أنّ النموذج المقترح يساهم في توفير زمن سفر الرافعة وفي تحسين إنتاجية العمل.

اقترح (Lien and Cheng 2014) خوارزمية النحل للجسيمات الهجينة (PBA) لحل مسألة تخطيط موقع الرافعة البرجية، استخدم البرمجة الخطية الصحيحة المختلطة لتشكيل تابع الهدف الممثل بتكلفة التشغيل الإجمالية للرافعة. وأثبت أن الخوارزمية الهجينة (PBA) قادرة على تحسين موقع وتقليل تكاليف التشغيل الإجمالية للرافعة البرجية الواحدة فقط.

طور (Abdelmegid, Shawki et al. 2015) نموذج أمثل لحل مشكلة موقع الرافعة البرجية باستخدام الخوارزميات الجينية (GA)، اعتمد النموذج على تقليل إجمالي وقت عمل الرافعة أثناء نقل مواد أعمال البيتون المسلح لهيكل فندق خمس نجوم، استخدم الـ Matlab لتمثيل النموذج المقترح وأجرى تحليل حساسية على متغيرات الـ GA وحدد القيم الأنسب لها، كما تمكّن من تحديد المنطقة المجدية للرافعة البرجية بيانياً وللتحقق من دقة الحسابات قارن إجمالي الوقت الناتج من النموذج مع الوقت المحسوب يدوياً وكانت النتائج متطابقة تقريباً.

أنشأ (Li, Fu et al. 2018) خوارزمية تحسين لمسألة تخطيط الرافعة البرجية (TCL) وفق أربع نماذج رئيسية وقد أوضحت النتائج تفضيل حركة دوران قاعدة ذراع الرافعة على حركة العربة المنزلقة كونها تعطي حل أمثل بتكلفة تشغيل أقل للرافعة.

قارن (Kaveh 2018) أداء خوارزمية أسراب الطيور مع أداء أربع أنواع مطوّرة من خوارزميات الأدلة العليا، خوارزمية الأجسام المتصادمة (CBO) وخوارزمية الأجسام المتصادمة المحسّنة (ECBO) وخوارزمية الجسيمات الاهتزازية (VPS) وخوارزمية الجسيمات الاهتزازية المحسّنة (EVPS)، من حيث فعاليتها في تحسين موقع الرافعة البرجية، وأثبتت نتائج بحثه على مشروع بناء عالي الارتفاع، ضمن بيئة الماتلاب (Matlab) تفوق أداء خوارزمية الأجسام المتصادمة المحسّنة (ECBO) على أداء الخوارزميات الأخرى.

وبالتالي فقد تناولت الدراسات العديد من نماذج تحسين موقع الرافعة البرجية والتي تختلف من حيث درجة تعقيدها من جهة، ومن حيث ملاءمتها لظروف موقع البناء من جهة، فلا يمكن الجزم بأفضلية إحدى هذه الخوارزميات كما أن تطبيق هذه الخوارزميات كان محدوداً بالحالة المدروسة ويحتاج إلى مستخدم خبير للوصول إلى الحل الأمثل.

يقوم البحث بتوطين التقنيات العالمية الحديثة وتطويرها ضمن الواقع السوري حيث يستخدم خوارزمية أسراب الطيور (PSO) كإحدى خوارزميات الذكاء الصناعي لتقليل زمن سفر الرافعة كتابع هدف للحصول على الحل الأمثل لموقع الرافعة، وقد تم اختيار هذه الخوارزمية لسهولة استخدامها ولقدرتها في الوقت نفسه على إعطاء نتائج تتقارب مع الخوارزميات الأخرى وقد تتفوق عليها أحياناً، كما أن البحث سيدمج بين هذه الخوارزمية وبين نمذجة حدود موقع البناء ضمن بيئة الـ Revit BIM ووضع كود لهذه الخوارزمية ضمن Dynamo قابل للتطوير مع اختلاف أنواع الارتفاعات واختلاف ظروف البناء، ويقدم للمقاول الذي لا يملك خبرة برمجية عالية مخرجات 3D دقيقة للموقع الأفضل للرافعة البرجية.

مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة البحث بعدم وجود نظام دقيق محدد لدى المقاولين في مرحلة ما قبل البناء لإدارة موقع الرافعة البرجية في مشاريع التشييد السورية، إذ أن اعتمادهم الأكبر على الحس الذاتي والخبرة السابقة والتقنيات التقليدية التي تعتمد على إمكانية الرافعة في خدمة محيط المشروع مما قد يسبب مشاكل هائلة أثناء التنفيذ تؤثر سلباً على معدل الإنتاج والزمن والكلفة. بالإضافة إلى وجود مشكلة في تعقيد تطبيق خوارزميات التحسين العالمية والحاجة إلى استخدامها من قبل خبراء للوصول إلى الحل الأمثل ومحدوديتها للحالات المدروسة.

أهمية البحث وأهدافه:

يعدّ تمركز الرافعة البرجية في مكانها المناسب ضمن موقع التشييد شرطاً أساسياً وضرورياً، وذلك نظراً للتأثيرات الإيجابية العديدة التي يعكسها الموقع الملائم على الكفاءة الإجمالية للمشروع، ومن هنا تنطلق أهمية البحث من ضرورة الاستفادة من التقنيات الحديثة المتطورة والمستندة على الذكاء الاصطناعي لإيجاد الموقع الأمثل للرافعة البرجية.

يهدف البحث إلى تحسين تخطيط موقع الرافعة البرجية (TCLP) ضمن مشاريع التشييد بشكل عام عبر تحقيق الأهداف الجزئية التالية:

- وضع نموذج حاسوبي لموقع التشييد، يضم موقع وأبعاد الهياكل الدائمة والمؤقتة وحدود الموقع العام ضمن بيئة الـ Revit BIM.

- إيجاد الموقع الأمثل للرافعة البرجية من الناحية النظرية وذلك بالاستعانة بأدوات الذكاء الاصطناعي (خوارزمية إسراب الطيور Particle Swarm Optimization Algorithm (PSO)) ضمن بيئة الـ Dynamo.
- مقارنة الموقع الفعلي المختار من قبل المهندسين مع الموقع المثالي الذي تم إيجاده عبر الخوارزمية.

تساؤلات البحث:

- كيف يمكن تحسين التنبؤ بالموقع الأمثل للرافعة البرجية الوحيدة بناءً على إجمالي وقت السفر المطلوب لنقل المواد المختلفة؟
- ما مدى جودة وضع الرافعة البرجية التي يستخدمها المقاول في الحالة الدراسية وهل تؤدي التقنيات التقليدية المعتمدة إلى نتائج مقبولة؟

حدود البحث:

يقتصر البحث على:

- الرافعة البرجية الفريدة في موقع التشييد وذات الدوران العلوي التي تخدم المناطق ضمن حدود الموقع.
- جميع نقاط تزويد المواد ثابتة أثناء البحث عن الحل الأمثل.

طرائق البحث ومواده:

يستخدم البحث المنهجية التحليلية باستخدام الأدوات التالية:

- 1- خوارزمية أسراب الطيور (PSO) كإحدى خوارزميات الذكاء الصناعي وقد تم اختيار هذه الخوارزمية لسهولة استخدامها ولقدرتها في الوقت نفسه على إعطاء نتائج تتقارب مع الخوارزميات الأخرى وقد تتفوق عليها أحياناً.
 - 2- تطبيق النمذجة البصرية (Dynamo) ضمن بيئة الـ BIM تمكن المقاول من الحصول على الموقع الأمثل للرافعة دون الحاجة إلى امتلاكه خبرة برمجية عالية مع وجود إمكانية تطبيق الخوارزمية المقترحة عدة مرات وعلى عدة أبنية مع العلم أنها قابلة للتطوير تبعاً لتغير عدد الطوابق وأنواع الروافع المستخدمة.
- يمكن تلخيص المنهجية المتبعة بالمراحل التالية:

- 1- نمذجة مخطط موقع البناء وتحديد مواقع تزويد المواد ومواقع التفريغ ضمن بيئة الـ Revit BIM وتعريفها كمدخلات للخوارزمية المقترحة لاحقاً ضمن الـ Dynamo.
- 2- عرض واتباع الخطوات اللازمة لتكوين تابع الهدف المتمثل بزمن سفر الرافعة تبعاً لنوع الرافعة المقترح مع العلم أن هذه الخطوات يمكن تطبيقها من أجل أي نوع من الرافعات البرجية بمعرفة الخصائص اللازمة.
- 3- استخدام خوارزمية أسراب الطيور لإيجاد الحل الأمثل لموقع الرافعة بحيث يجعل تابع الهدف المتمثل بزمن السفر أقل ما يمكن وتكويد هذه الخوارزمية بلغة الـ python ضمن الـ Dynamo.
- 4- تطبيق النموذج المقترح على حالة دراسية (كلية طب الأسنان في جامعة تشرين) وتقييم جودة النتائج وإعطاء التوصيات اللازمة.

أنواع الرافعات البرجية:

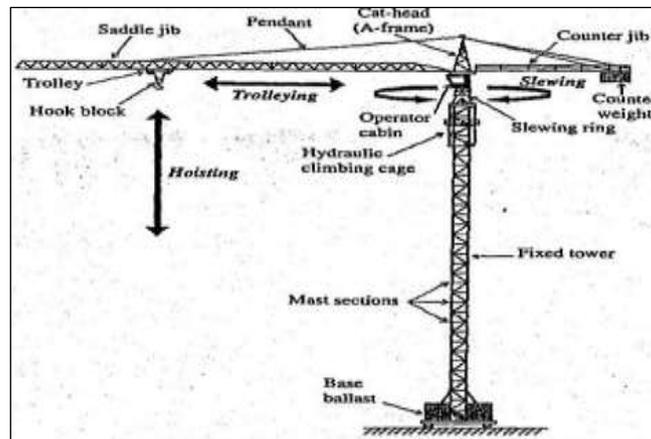
تُستخدم الرافعات البرجية بشكل واسع في مواقع تشييد المباني لرفع وتحريك الأحمال على طول ذراع الرافعة مع إمكانية الدوران حول محورها المركزي ثم تنزيل مواد البناء المختلفة إلى أي نقطة عمل مطلوبة مع شرط ضمان المسافات ما بين الحمولة المرفوعة والذراع الرأسي أو الأفقي للرافعة وما بين الحمولة المعاكسة المرفوعة والمرافق القائمة (Han,)

Al-Hussein et al. 2012). تقوم الرافعات البرجية بتحريك الأحمال على مساحة واسعة كما تعمل ضمن نطاق ارتفاعات رأسية غير محدود تقريباً، وتعتبر الأنواع الثلاثة الأكثر شيوعاً للرافعات البرجية هي: رافعة متحركة مزودة ببرج رأسي معلق، ورافعة متحركة ذات هيكل علوي مثبت فوق البرج، ورافعة ذات برج عمودي مع ذراع (Peurifoy, Schexnayder et al. 2018) والنوع الأخير هو الذي تم تناوله في دراستنا.

مكونات الرافعة البرجية:

تتكون الرافعة البرجية من الأقسام التالية كما هو موضح في الشكل (1) (Tam and Fung 2011):

1. الأساس البيتوني: يتم صبه قبل بضعة أيام من بداية تجميع الرافعة ليتم فيما بعد تثبيت الرافعة عليه إذ يحمل ويدعم هيكلها الكامل .
2. البرج: يتكون من مجموعة من الأعمدة الشبكية المترابطة معاً ، تعطي للرافعة الارتفاع اللازم لعملها، يؤمن الأساس البيتوني والبرج الثبات للرافعة ويمنعان انقلابها .
3. وحدة الدوران: تتكون من الترس والمحرك، ما يسمح للرافعة بالدوران
4. الذراع العامل: يمتد عمودياً على البرج، ويضم الخطاف والعربة المتحركة اللذان يرفعان الحمولة.
5. الذراع المضاد: يضم الأوزان والبكرات اللازمة لتوازن الرافعة
6. الخطاف والعربة المتحركة: يقوم الخطاف الرئيسي برفع الأحمال ويرتبط بالعربة المتحركة تسمح له بالارتفاع والانخفاض والحركة تجاه البرج وبعيداً عنه وذلك بمساعدة الكابلات والبكرات المتصلة بالعربة المتحركة .
7. حجرة التشغيل: تعد مركز التحكم للرافعة وتتصل بوحدة الدوران، ولبلوغ الحجرة يجب على العامل تسلق البرج باستخدام السلالم.



الشكل (1): أقسام الرافعة البرجية (Tam and Fung 2011).

نمذجة مخطط موقع البناء:

تعتمد نمذجة مخطط موقع البناء على ثلاث مراحل أساسية:

1- تمثيل العناصر في موقع البناء في الفضاء الديكارتي مع إحداثيات مرجعية:

تتمثل الخطوة الأولى في إنشاء نموذج في مساحة الإحداثيات الديكارتي بحيث يتم تمثيل الكائنات في موقع البناء بمكافئات في نموذج الحاسب وبمعنى آخر عندما يكون للأجسام أشكال غير مستطيلة، يجب تبسيطها إلى أجسام مستطيلة أو مثلثة بمساحات متكافئة (Alkriz and Mangin 2005) لأن المعادلات التي تتحقق من التداخل تستند إلى كائنات مستطيلة.

2- تخصيص أعباء العمل لكل منطقة عمل:

يتم في هذه الخطوة تقسيم كل طابق يتم خدمته بواسطة الرافعة إلى مناطق عمل ويتم تخصيص نسبة معينة من إجمالي عبء العمل لكل منطقة عمل. تعتبر هذه الخطوة أساس عملية النمذجة، إذ أنها تحاكي الوظائف الحيوية الحقيقية للرافعة كون المواد اللازمة لإكمال النشاط لا يتم نقلها دفعة واحدة.

بعد تحديد مواقع تزويد المواد الثابتة ومواقع التفريغ المحسوبة سيتم نمذجتها ضمن بيئة الـ Revit BIM وتعريفها كمداخل للخوارزمية التي سيتم تكويدها بلغة الـ python ضمن الـ Dynamo. ويعتبر تطبيق النمذجة البصرية (Dynamo) ضمن بيئة الـ BIM أحد أهم التطبيقات المستخدمة لنمذجة المنشآت الهندسية المختلفة (Omran 2018).

3- تجنب التعارض بين الكائنات:

يتم في هذه المرحلة التحقق من مواقع الكائنات الممثلة في نموذج الموقع للتأكد من عدم وجود تداخلات أو تجاوزات لأي شروط يتم فرضها. يتم وضع جميع هذه الشروط على شكل مترجمات يجب تحقيقها.

الشرط الأول: يجب التحقق ما إذا كان ذراع الرافعة قادر للوصول إلى جميع نقاط التزويد والتفريغ وخدمة جميع المواقع من خلال المترجمة الميينة أدناه (Alkriz and Mangin 2005).

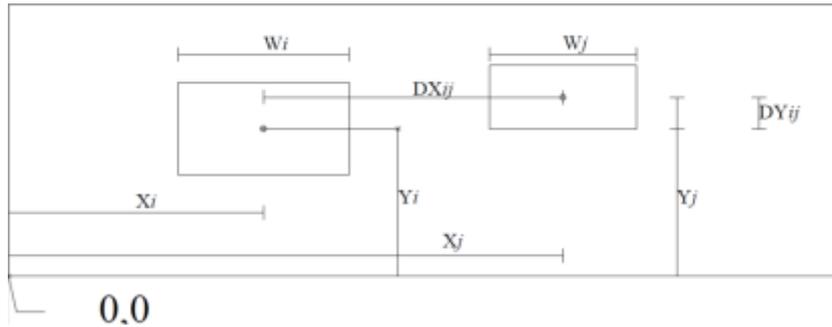
$$(\max(Dj, Di) \leq lcr$$

Dj, Di: المسافة من موقع الرافعة إلى أي نقطة تزويد أو تفريغ على التوالي.

Lcr: طول الذراع العامل للرافعة.

يمكن التحقق من هذا الشرط يدوياً عن طريق رسم دوائر بنصف قطر يساوي طول الذراع العامل للرافعة وذلك من مركز كل نقطة تزويد وتفرغ، يجب أن يقع أي موقع مقترح للرافعة البرجية عند تقاطع جميع الدوائر ويمكن إجراء هذا الفحص على الموقع النهائي المقترح للتأكد من أنه يخدم جميع النقاط في الموقع (Tadesse 2019).

الشرط الثاني: يجب التحقق من مواقع الكائنات في نموذج الموقع لتجنب التداخلات (Alkriz and Mangin 2005). يوضح الشكل (2) المتغيرات ونظام الإحداثيات المستخدم للتحقق من أي تجاوزات لشروط التداخل.



الشكل (2): المتغيرات ونظام الإحداثيات المستخدم للتحقق من أي تجاوزات لشروط التداخل (Tadesse 2019).

يتم التحقق من المترجمة التالية:

$$\max \left[\begin{array}{l} \left(dX_{ij} - \frac{W_j + W_i}{2} \right) * \left(dX_{ij} + \frac{W_j + W_i}{2} \right) \\ \left(dY_{ij} - \frac{A_j}{2W_j} - \frac{A_i}{2W_i} \right) * \left(dY_{ij} + \frac{A_j}{2W_j} + \frac{A_i}{2W_i} \right) \end{array} \right] \geq 0$$

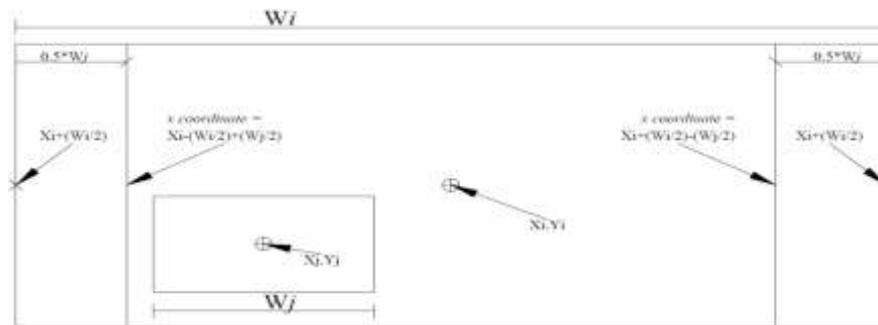
$$dX_{ij} = X_j - X_i \quad \& \quad dY_{ij} = Y_j - Y_i$$

X,Y: الإحداثيات المركزية للكائنات. W: عرض الكائنات.

A: مساحة الكائنات. H_j: ارتفاع الكائن ويساوي $\frac{A_j}{2W_j}$.

تتحقق المتراجحة الأولى من التداخلات في اتجاه x بينما تتحقق المتراجحة الثانية من التداخلات في اتجاه y (Tadesse 2019).

الشرط الثالث: يجب التحقق من أن أي موقع مقترح للرافعة البرجية يقع بالكامل ضمن حدود موقع البناء ، يتم تصميم قاعدة الرافعة البرجية على شكل مستطيل ويتم التعامل معها كأى كائن آخر في النموذج (Tadesse 2019).
يوضح الشكل (3) المتغيرات ونظام الإحداثيات المستخدم للتحقق من الشرط.



الشكل (3): المتغيرات ونظام الإحداثيات المستخدم للتحقق من شرط تواجد الموقع المقترح للرافعة البرجية ضمن حدود موقع البناء (Tadesse 2019).

يتم التحقق من المعادلة التالية:

$$X_j \in \left[X_i + \frac{W_j - W_i}{2}, X_i + \frac{W_i - W_j}{2} \right]$$

$$Y_j \in \left[Y_i + \left(\frac{A_j}{2W_j} - \frac{A_i}{2W_i} \right), Y_i + \left(\frac{A_i}{2W_i} - \frac{A_j}{2W_j} \right) \right]$$

i: مركز الموقع. j: مركز الرافعة.

وتعتبر هذه الخطوة هامة لتحديد قيود تابع الهدف الذي نسعى لجعله أقل مايمكن ضمن خوارزمية (PSO) المعرفة لاحقاً.

حساب زمن سفر الرافعة:

يسعى البحث إلى التقليل من قيمة معادلات زمن سفر الرافعة التي طورها (Zhang, Harris et al. 1999)، إذ أنه ناقش مجموعة متنوعة من المتغيرات التي تؤثر على زمن السفر للتنبؤ بدقة بالزمن الذي تستغرقه الحمولة للانتقال من نقطة التزويد إلى نقطة التفريغ.

تعتمد المعادلات على ثلاث حركات متميزة (حركة الرفع وحركة العربة وحركة الدوران) تقوم بها الرافعة عند نقل الحمولة ويكون إجمالي زمن السفر هو مجموع زمن هذه الحركات الثلاث. يتم نقل الأحمال من نقطة التزويد إلى كل منطقة من مناطق العمل، والزمن الذي يستغرقه الطابق بأكمله هو مجموع الزمن المستغرق لكل منطقة عمل.

تكون معادلات زمن السفر كما طورها (Zhang, Harris et al. 1999) بالنسبة للرافعة البرجية الموجودة ضمن الإحداثيات (X_c, Y_c) كما يلي:

$$L_i = \sqrt{(X_{si} - X_c)^2 + (Y_{si} - Y_c)^2}$$

$$L_j = \sqrt{(X_{dj} - X_c)^2 + (Y_{dj} - Y_c)^2}$$

$$L_{ij} = \sqrt{(X_{si} - X_{dj})^2 + (Y_{si} - Y_{dj})^2}$$

$$Z_{ij} = |Z_{si} - Z_{dj}|$$

$$\theta_{ij} = \arccos\left(\frac{L_i^2 + L_j^2 - L_{ij}^2}{2 * L_i * L_j}\right)$$

$$0 \leq \theta_{ij} \leq \pi$$

يتم حساب زمن السفر الأفقي للخطاف T_{hij} للانتقال من نقطة التزويد S_i إلى نقطة التفريغ D_j كما يلي:

$$T_a = \frac{|L_i - L_j|}{V_a}$$

V_a : السرعة الأفقية (m/min).

$$T_w = \frac{\theta_{ij}}{w}$$

W : سرعة الدوران (rad/min).

$$T_{hij} = \max(T_a, T_w) + \alpha * \min(T_a, T_w)$$

يتم حساب زمن السفر الرأسي للخطاف T_{vij} للانتقال من نقطة التزويد S_i إلى نقطة التفريغ D_j كما يلي:

$$T_{vij} = \frac{Z_{ij}}{V_v}$$

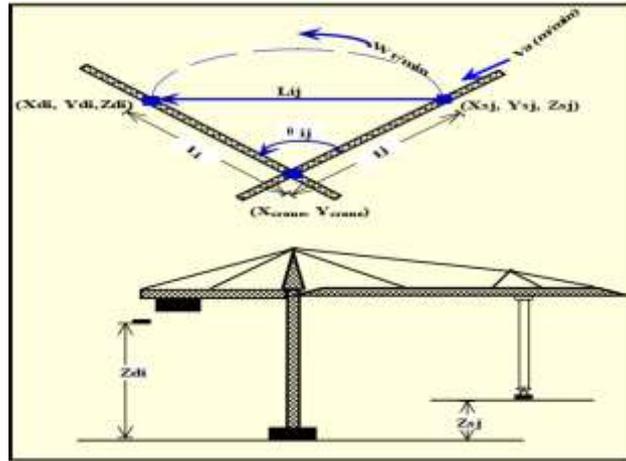
V_v : السرعة الرأسية.

يتم حساب زمن السفر الكلي للخطاف T_{ij} للانتقال من نقطة التزويد S_i إلى نقطة التفريغ D_j كما يلي:

$$T_{ij} = \max(T_{hij}, T_{vij}) + \beta * \min(T_{hij}, T_{vij})$$

$$\alpha, \beta \in (0, 1)$$

يوضح الشكل (4) تمثيلاً بيانياً للمعادلات والمتغيرات المستخدمة من قبل (Zhang, Harris et al. 1999) لنمذجة حركات الرافعة البرجية.



الشكل (4): نمذجة حركات الرافعة البرجية (Zhang, Harris et al. 1999).

أضاف (Zhang, Harris et al. 1999) تأثير الحركات المتزامنة على زمن السفر الرأسي إلى معادلات زمن السفر عبر البارامترين α, β ، ويعتمد اختيار قيم البارامترين على ظروف الموقع وخبرة المشغل. تعتمد سرعة الرفع الرأسية (Vv) على وزن الحمولة، ومع اقتراب وزن الحمولة من السعة القصوى المقدر للرافعة، ستتخفض السرعة التي يمكن رفعها بها. يوضح الجدول (1) قيم سرعة الرفع الرأسية لرافعة الدراسة (Liebherr 63 LC) (Liebherr-Werk 2000)، ومن الواضح أنه كلما زاد وزن الحمولة، تنخفض سرعة الرفع الرأسية القصوى.

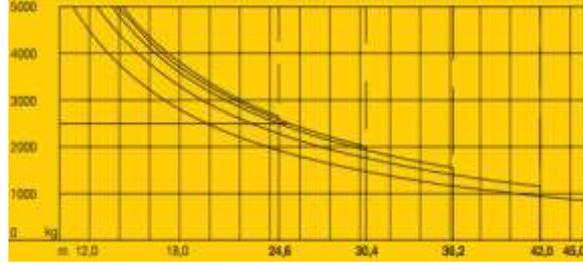
الجدول (1): قيم سرعة الرفع الرأسية لرافعة الدراسة (Liebherr 63 LC) (Liebherr-Werk 2000).

	Stufe / Step Cran / Marcia / Marcha / Marcha	kg	m/min
 4,6 / 14,0 / 14,0 kW 2 Lagen Layers Couches strati camadas capas 49,0 m	1	2500	8,0
	2	2500	28,0
	3	1300	56,0
 7 Lagen Layers Couches strati camadas capas 119,0 m mit LS-Trommel	1	5000	4,0
	2	5000	14,0
	3	2400	28,0
 3,7 / 18,5 / 18,5 kW 6 Lagen Layers Couches strati camadas capas 148,0 m	1	2500	7,0
	2	2500	33,0
	3	1300	65,0
 1	5000	3,5	
	2	5000	18,5
	3	2500	32,5

تتعلق قدرة الرفع القصوى للرافعة بالموقع الذي تتدلى منه الحمولة على طول ذراع الرافعة، وتقلل قوانين الميكانيكا من قدرة الرفع القصوى للرافعة عندما تتحرك الحمولة بعيداً عن البرج (Peurifoy, Schexnayder et al. 2018). قد تكون الرافعة قادرة على رفع الحمولة بأمان من نقطة التزويد إلا أنها قد تكون غير قادرة على تسليم الحمولة عند نقطة التفريغ نظراً لتجاوز وزن الحمولة حد قدرة رفع الرافعة عند نقطة التفريغ (Abdelmegid, Shawki et al. 2015)، وهذا يدل أن قدرة الرفع القصوى للرافعة محدودة بالمعادلة التالية:

$$weight_{max} = \min(\text{capacity at supply point}, \text{capacity at demand point})$$

يمكن توضيح هذا التأثير بيانياً باستخدام منحنيات نصف قطر الحمولة المتوفرة لرافعة الدراسة (Liebherr 63 LC) (Liebherr-Werk 2000) كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل (5): منحنيات نصف قطر الحمولة لرافعة الدراسة (Liebherr 63 LC) (Liebherr-Werk 2000).

يجب التحقق من قابلية تقسيم الحمولة التي يتم نقلها إذا تجاوز وزن الحمولة قدرة الرفع القصوى للرافعة، إذ يمكن تقسيم الحمولة إلى أحمال أصغر ونقلها بالترتيب لإكمال المهمة وهذا فقط إذا كانت الحمولة قابلة للتقسيم وإلا كان الموقع المرشح لها غير صحيح.

وضع (Abdelmegid, Shawki et al. 2015) معادلة تسمح بحساب عدد الرحلات N_{ij} بين النقطتين i و j حيث يعتمد العدد الإجمالي للرحلات على وزن الحمولة Q_{ij} وقدرة الرفع القصوى للرافعة C_j .

$$N_{ij} = \frac{Q_{ij}}{C_j}$$

خوارزمية أسراب الطيور (PSO) Particle Swarm Optimization:

تم استخدام تقنيات التحسين العشوائي (metaheuristics) بشكل واسع في العثور على الموقع الأمثل نظراً لكفاءتها وسهولة تطبيقها، ومن هذه التقنيات تقنية PSO التي تم اكتشافها من قبل (Kennedy and Eberhart 1995) وقد تم اختيار هذه الخوارزمية لسهولتها ولقدرتها في الوقت نفسه على إعطاء نتائج تتقارب مع الخوارزميات الأخرى وقد تتفوق عليها أحياناً، وهي تحاكي سلوك أسراب الطيور في الطبيعة لإيجاد حلول فعالة أثناء محاولتهم في العثور على أفضل مصدر للغذاء؛ وانطلاقاً من ذلك يكون هناك مجموعة من الجسيمات تبحث في مساحة الحل تعمل بشكل فردي وتتعاون مع جسيمات أخرى في السرب لإيجاد الحل الأمثل، وعلى مدى عدة تكرارات تتقارب الجسيمات إلى الحل الأمثل. تعمل خوارزمية الـ PSO وفق الخطوات التالية (Shi 2004):

1. تهيئة N جسيم، ينتشر بشكل عشوائي في جميع أنحاء مساحة البحث عن طريق التخصيص العشوائي لإحداثيات x و y باستخدام مولد عشوائي منتظم بحيث تكون $x_i \in [xmin, xmax]$ و $y_i \in [ymin, ymax]$.
2. حساب قيمة الملاءمة لكل جسيم باستخدام تابع الهدف المحدد.
3. إيجاد أفضل قيمة ملاءمة محققة من قبل كل جسيم أو أفضل محلي (pbest)، وأفضل قيمة ملاءمة محققة ضمن السرب أو أفضل عالمي (gbest).

4. حساب الموقع المرشح التالي لكل جسيم باستخدام الصيغة التالية:

$$V_{id,t+1} = wV_{id,t} + [c_1 * U[0,1]] * (p_{id} - x_{id}) + [c_2 * U[0,1]] * (p_{gd} - x_{id})$$

حيث:

V_{id} : شعاع السرعة. W : عامل القصور الذاتي أو الخمود.

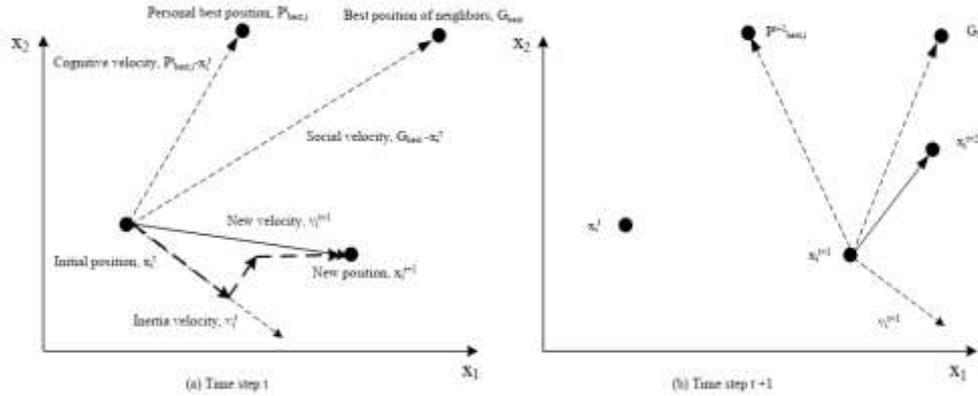
c_1, c_2 : عوامل تحدد ما إذا كان البحث المحلي أو العالمي ذو أولوية.

$p_{id} = pbest$: أفضل محلي. $p_{gd} = gbest$: أفضل عالمي.

x_{id} : قيمة الملائمة الحالية للجسيم.

5. تكرار الخطوات من 2-4 حتى يتم استيفاء معايير التوقف.

يوضح الشكل (6) كيف يعتمد تموضع موقع المرشح التالي على مواقع (أفضل محلي وأفضل عالمي) وشعاع السرعة (Viswa Bharathy and Mahabub Basha 2017).



الشكل (6): تحديث تموضع الجسيم ضمن مساحة البحث ثنائية البعد (Viswa Bharathy and Mahabub Basha 2017).

تم تطوير العديد من متغيرات الـ PSO لمعالجة مسائل التحسين المختلفة، بما في ذلك مسائل التحسين المقيد والمسائل التجميعية ومسائل الـ (min-max). تؤثر هذه المتغيرات على كفاءة خوارزمية الـ PSO ونذكر منها (Viswa Bharathy and Mahabub Basha 2017):

- U : رقم عشوائي منتظم بين $[0,1]$ ، يعمل كعامل تدرج ويضمن العشوائية في البحث.
- ω : عامل القصور الذاتي أو الخمود، يحدد تأثير السرعة السابقة على السرعة التالية. بدون هذا العامل، تميل الخوارزمية إلى "الانفجار" ولا تتقارب الجسيمات.
- $c1$ and $c2$: عوامل تحدد ما إذا كان البحث المحلي أو العالمي ذو أولوية.
- N : عدد الجسيمات المراد تهيئتها.

يعتمد اختيار معايير توقف خوارزمية التحسين على التجارب وعلى المعرفة المتعلقة بمشكلة التحسين.

دمج خوارزمية أسراب الطيور مع زمن سفر الرافعة:

يحتوي النموذج المقترح على وحدتين تعملان في انسجام تام للعثور على أفضل موقع للرافعة البرجية. تقوم وحدة الـ PSO بتوليد مواقع عشوائية في حين تقوم وحدة حساب زمن السفر (TTC) بتقدير زمن السفر. بحيث يكون ناتج معادلات زمن السفر هو قيمة تابع الهدف التي تعمل خوارزمية الـ PSO على تحسينها، ويتم استخدام هذه القيمة للحكم على ملائمة كل حل مرشح وتوليد الحلول المرشحة التالية. وهكذا تتكرر العملية حتى يتم الوصول إلى أقصى عدد من التكرارات. من الجدير بالذكر إن تطبيق النمذجة البصرية (Dynamo) لخوارزمية أسراب الطيور المقترحة ضمن بيئة الـ Revit BIM تمكن المقاول من الحصول على الموقع الأمثل للرافعة دون الحاجة إلى امتلاك المقاول خبرة برمجية عالية مع وجود إمكانية تطبيق الخوارزمية المقترحة عدة مرات وعلى عدة أبنية مع العلم أنها قابلة للتطوير تبعاً لتغير عدد الطوابق وأنواع الروافع المستخدمة.

حالة دراسية (كلية طب الأسنان/ جامعة تشرين):

يتألف مشروع مبنى كلية طب الأسنان الجديدة من خمس طوابق (قبو وأرضي وأول وثاني وثالث). كل طابق مقسم إلى عدة مناطق عمل أو كتل. تتألف الكتلة B1 من طابق أرضي وأول وثاني وثالث بمساحة تقريبية إجمالية طابقية تقدر بـ $845 m^2$ ، تتألف الكتلة B2 من طابق أرضي وأول وثاني وثالث بمساحة تقريبية إجمالية طابقية تقدر بـ $1357 m^2$ ، تتألف الكتلة B3 من قبو وطابق أرضي وأول وثاني وثالث بمساحة تقريبية إجمالية طابقية تقدر بـ $675 m^2$ ، تتألف الكتلة B4 من قبو وطابق أرضي وأول وثاني وثالث بمساحة تقريبية إجمالية طابقية تقدر بـ $448.5 m^2$ ، تتألف الكتلة B5 من قبو وطابق أرضي وأول وثاني وثالث بمساحة تقريبية إجمالية طابقية تقدر بـ $1867 m^2$ ، تم اختيار رافعة برجية وحيدة من نوع Liebherr 63 LC لتخدم وتنقل مواد البناء المختلفة (حديد تسليح، قوالب خشبية، بلوك جدران، بلوك هوردي، طينة اسمنتية، بلاط وسيراميك) لجميع الطوابق، تم استخراج الكميات التقديرية لمواد البناء المختلفة من دفاتر المساحة المعدة من قبل الشركة العامة للبناء والتعمير لعام 2006 كما هو موضح في الجدول (2).

الجدول (2): الكميات التقديرية لمواد البناء المختلفة.

كميات حديد التسليح (kg)					
الكتل	قبو	أرضي	أول	ثاني	ثالث
B1	—	123961.442	104996.612	96172.85	60798.203
...
B5	225974.707	142442.195	142491.396	116025.041	27400.172
قوالب خشبية (m^2)					
B1	—	2546.265	2507.3	2509.875	1679.01
...
B5	4701.915	3415.299	3611.993	3474.7741	834.249
بلوك جدران (m^2)					
B1	—	104.53	87.30	92.30	81.14
...
B5	90.10	134.14	144.41	156.96	58.05
بلوك هوردي (عدد)					
B1	—	8183	8183	8183	5304
...
بلاط (m^2)					
...
B5	1688.08	1527.6	1563.96	1692.12	345.36
سيراميك (m^2)					
B2	—	427.2	427.2	427.2	424.8
B5	398.8	418.8	427.2	427.2	424.8

يبين الشكل (10) جزء من الكود البرمجي لخوارزمية أسراب الطيور ضمن بيئة الـ dynamo.

```

422 class Particle:
423     def __init__(self, bounds):
424         self.particle_position = [] # particle position
425         self.particle_velocity = [] # particle velocity
426         self.local_best_particle_position = [] # best position of the particle
427         self.fitness_local_best_particle_position = initial_fitness # initial objective function value of the best parti
428         self.fitness_particle_position = initial_fitness # objective function value of the particle position
429
430     for i in range(mv):
431         self.particle_position.append(
432             random.uniform(bounds[i][0], bounds[i][1])) # generate random initial position
433         self.particle_velocity.append(random.uniform(-1, 1)) # generate random initial velocity
434
435     def evaluate(self, objective_function):
436         self.fitness_particle_position = objective_function(self.particle_position)
437         if m== -1:
438             if self.fitness_particle_position < self.fitness_local_best_particle_position:
439                 self.local_best_particle_position = self.particle_position # update the local best
440                 self.fitness_local_best_particle_position = self.fitness_particle_position # update the fitness of the lo
441         if m== 1:
442             if self.fitness_particle_position > self.fitness_local_best_particle_position:
443                 self.local_best_particle_position = self.particle_position # update the local best
444                 self.fitness_local_best_particle_position = self.fitness_particle_position # update the fitness of the lo
445     def update_velocity(self, global_best_particle_position):
446         for i in range(mv):

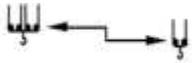
```

الشكل (10): جزء من كود خوارزمية أسراب الطيور (PSO) ضمن الـ Dynamo.

الرافعة البرجية المستخدمة في الحالة الدراسية:

قامت شركة المقاوله باختيار الرافعة البرجية من نوع (Liebherr 63 LC) (Liebherr-Werk 2000) لخدمة موقع مشروع كلية طب الأسنان، بطول ذراع يبلغ 45 m، وبسعة قصوى تبلغ 1 طن عند طرف الذراع. يصل أقصى ارتفاع لخدمة الرافعة إلى 37 m، وتقدر أبعاد قاعدة الرافعة بـ (3.8,3.8) m.

يوضح الشكل (11) جدول (نصف القطر - الحمولة) والمستخرج من دليل الرافعة (Liebherr-Werk 2000)



2.1-10.9	12	14	16	18	19.8														
5000	4480	3760	3220	2800	2500	20	22	24.6	28	30.4	34	36.2	40	42	45	m			
						2500	2330	2050	1770	1610	1410	1310	1160	1090	1000	kg			

الشكل (11): جدول (نصف القطر - الحمولة) للرافعة البرجية (Liebherr 63 LC) (Liebherr-Werk 2000).

تم صياغة السعة القصوى للرافعة عند نقاط مختلفة على طول الذراع باستخدام طريقة المربعات الصغرى Ordinary Least Squares (OLS) ضمن بيئة الـ python على النحو التالي، حيث تم قياس X بالـ cm:

Maximum Load (kg)

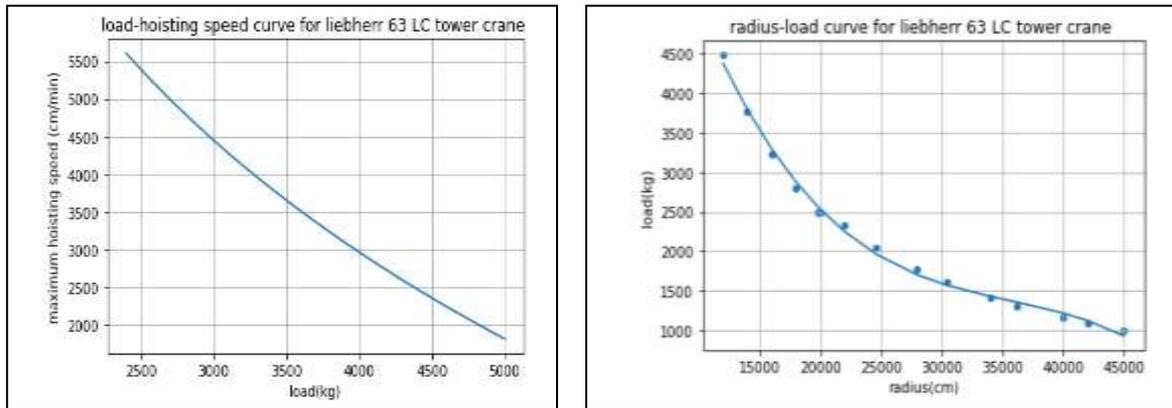
$$= \begin{cases} 5000, & x \in [0,1090] \\ -1.25 * 10^{-6} * x^3 + 0.0075 * x^2 - 16.75 * x + 10594 * 10^4, & x \in [1200,1800] \\ -3.049 * 10^{-5} * x^3 + 0.1846 * x^2 - 372.3643 * x + 2.528 * 10^5, & x \in [1800,2200] \\ -1.808 * 10^{-7} * x^3 + 0.0018 * x^2 - 6.3825 * x + 9724.5722, & x \in [2200,3040] \\ -7.758 * 10^{-8} * x^3 + 0.001 * x^2 - 4.2875 * x + 8001.6193, & x \in [3040,4000] \\ 5.608 * 10^{-8} * x^3 - 0.0006 * x^2 + 1.8417 * x + 0.0013, & x \in [4000,4500] \end{cases}$$

تتمتع الرافعة بسرعة رفع قصوى تبلغ 800 cm/min عندما تحمل حمولة قصوى تبلغ 5000 kg وتزداد السرعة القصوى إلى 5600 cm/min عندما تتخفف الحمولة إلى 2400 kg (Liebherr-Werk 2000). تم نمذجة هذه

المعلومات باستخدام دالة لوغاريتمية باستخدام طريقة المربعات الصغرى OLS ضمن بيئة الـ python على النحو التالي، حيث تم قياس X بالـ kg:

$$Hoisting\ Speed\ \left(\frac{cm}{min}\right) = \begin{cases} 5600, & x < 2400 \\ -5177,3291 * \log(x) + 4.59 * 10^4, & x \in [2500,5000] \end{cases}$$

يوضح الشكل (12): منحنى (نصف القطر - الحمولة) ومنحنى (الحمولة - سرعة الرفع).



الشكل (12): منحنى (نصف القطر - الحمولة) ومنحنى (الحمولة - سرعة الرفع).

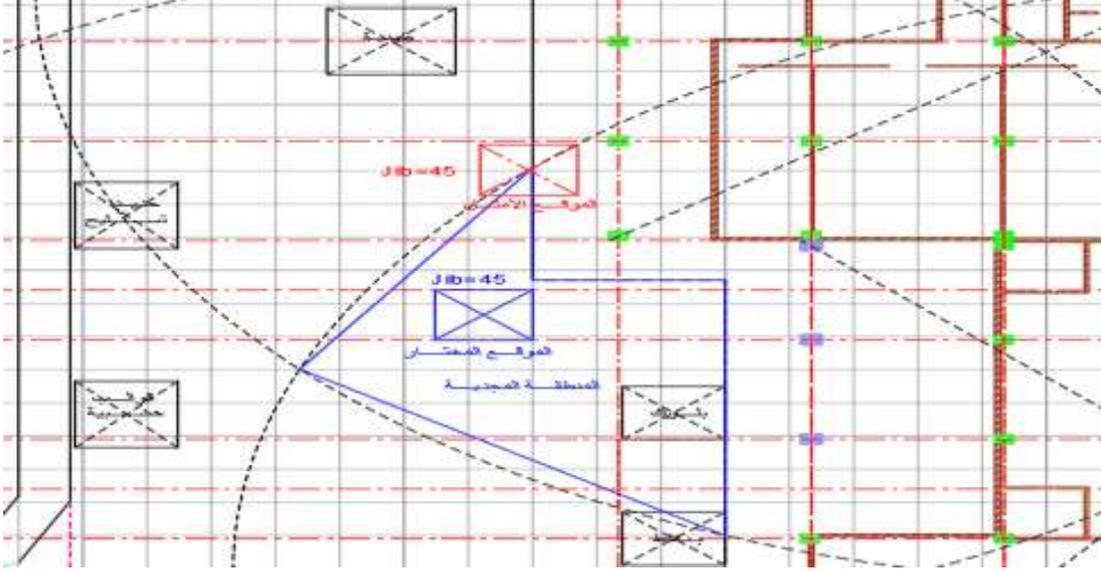
تتراوح السرعة الأفقية من 1900m/min إلى 4200m/min (Liebherr-Werk 2000) ولا تتأثر هذه السرعة بوزن الحمولة وإنما تتأثر فقط بقرب الحمولة التي يتم رفعها من المباني أو الأشياء الأخرى الموجودة في الموقع (Tadesse 2019). تم استخدام متوسط سرعة أفقية 3000 cm/min للنمذجة بينما تبلغ سرعة الدوران القصوى للرافعة البرجية 0.8 tr/min (Liebherr-Werk 2000)، والتي تم استخدامها خلال جميع العمليات ولا تتأثر هذه السرعة بوزن الحمولة التي يتم رفعها. نتائج خوارزمية أسراب الطيور.

تم اختبار دقة النتيجة والتقارب نحو الحل الأمثل بتجريب عدة قيم مختلفة لكل من: عدد الجسيمات (N) وعدد التكرارات (I)، والوزن المحلي (C1) والوزن العالمي (C2) وعامل القصور الذاتي (W). استطاعت الخوارزمية من خلال البحث داخل المنطقة المجدية توفير الجهد والوقت. يوضح الجدول (3) متغيرات الـ PSO التي تم من خلالها التقليل من زمن سفر الرافعة (Liebherr 63 LC) والتقارب نحو الحل الأمثل.

الجدول (3) متغيرات الـ PSO المثلى للرافعة البرجية (Liebherr 63 LC).

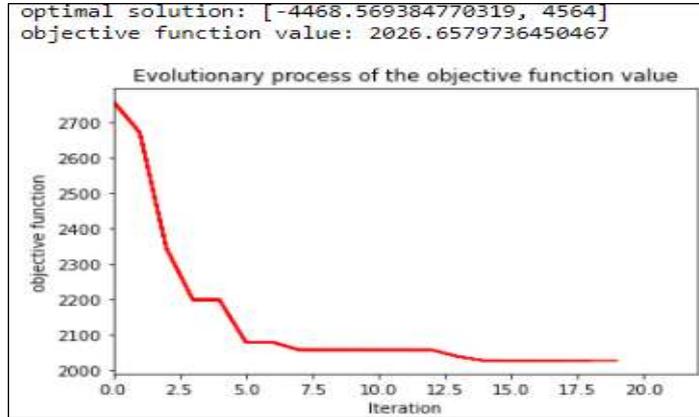
10	عدد الجسيمات (N)
20	عدد التكرارات (I)
1	الوزن المحلي (C1)
2	الوزن العالمي (C2)
0.8	عامل القصور الذاتي (W)

استطاعت خوارزمية أسراب الطيور إيجاد الموقع الأمثل للرافعة البرجية المختارة (Liebherr 63 LC) بطول ذراع $Jib=45\text{ m}$ عند الإحداثيات $(X = -44.68, Y = 45.6)\text{m}$ كما هو مبين في الشكل (13).



الشكل (13): الموقع الأمثل للرافعة البرجية المختارة (Liebherr 63 LC) بطول ذراع $Jib=45\text{ m}$ عند الإحداثيات $(X = -44.68, Y = 45.6)\text{m}$

يبين الشكل (14) أن تابع الهدف المتمثل بزمن سفر الرافعة حقق أدنى قيمة قدرت بـ 2026.657 min .



الشكل (14): قيم تابع الهدف للرافعة البرجية (Liebherr 63 LC) عند الإحداثيات المثلى $(X = -44.68, Y = 45.6)\text{m}$.

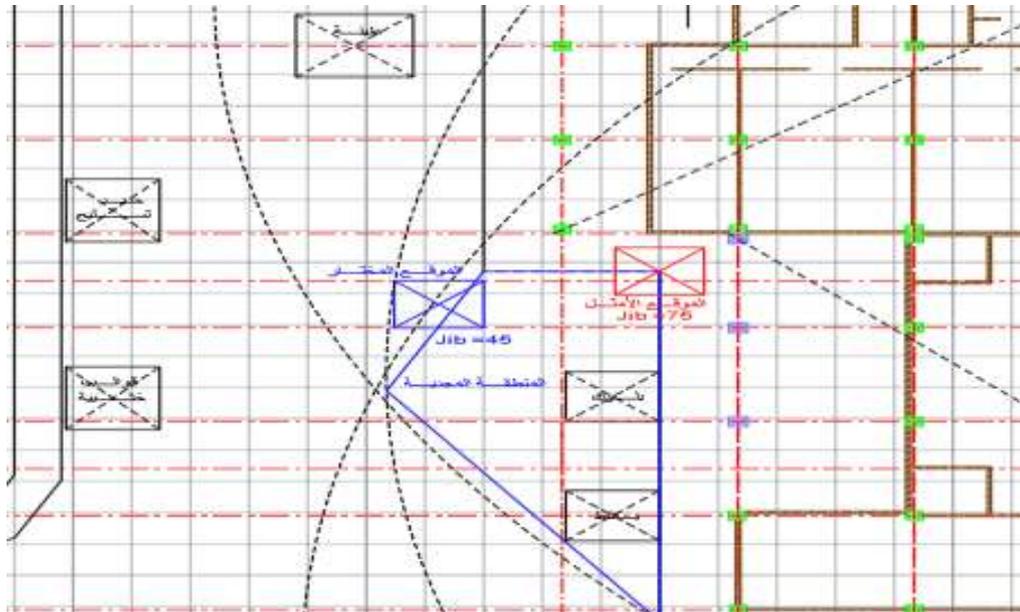
وعند حساب زمن سفر الرافعة البرجية (Liebherr 63 LC) ذات طول ذراع $Jib=45\text{ m}$ عند الإحداثيات المختارة من قبل المقال $(X = -46.87, Y = 34.14)\text{m}$ أعطى النتيجة القيمة (7016.333 min) ، وهذا ما يؤكد تفوق خوارزمية التحسين في تقليل زمن سفر الرافعة بنسبة 28.88% عند تحديد الموقع الأمثل لها، كما وتعتبر هذه النسبة جيدة مقارنة مع بعض النتائج العالمية فقد بلغت هذه النسبة 12% باستخدام الخوارزميات الجينية لدى (H. Abdel-Khalek 2013).

لا يخدم موقع الرافعة البرجية المختارة عملياً من قبل المقاول وكذلك الموقع الأمثل الناتج عن خوارزمية التحسين بعض نقاط التفريغ المطلوبة B2,B3,B4. لذلك فقد تم تطوير الخوارزمية بإضافة نوع آخر من الروافع البرجية هو (Liebherr 355 HC) (Liebherr-Werk 2000) بطول ذراع $Jib=75$ وصياغة المعادلات اللازمة لإيجاد تابع الهدف والقيود المرافقة، وتجريب عدة قيم مختلفة لكل من: عدد الجسيمات (P) وعدد التكرارات (I) والوزن المحلي (C1) والوزن العالمي (C2) وعامل القصور الذاتي (W) لخوارزمية التحسين، تم إيجاد متغيرات الـ PSO المثلى كما هو موضح في الجدول (4).

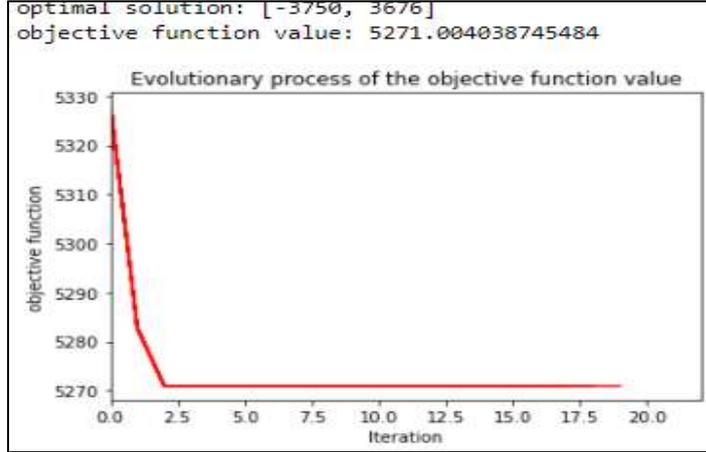
الجدول (4) متغيرات الـ PSO المثلى للرافعة البرجية (Liebherr 355 HC).

5	عدد الجسيمات (N)
20	عدد التكرارات (I)
1	الوزن المحلي (C1)
2	الوزن العالمي (C2)
0.8	عامل القصور الذاتي (W)

بتطوير الكود البرمجي السابق وإضافة معادلات الرافعة الجديدة عليه ضمن عقدة الـ Python تم الحصول على الموقع الأمثل للرافعة الجديدة عند الإحداثيات $(X = -37.5, Y = 36.76)m$ كما هو موضح في الشكل (15)، وقد خدم الموقع الأمثل جميع نقاط التزويد والتفريغ معطياً أقل قيمة لتابع الهدف قدرت بـ 5271 min كما هو موضح في الشكل (16).



الشكل (15): الموقع الأمثل للرافعة البرجية المختارة من قبل الباحث (Liebherr 355 HC) بطول ذراع $Jib=75$ m عند الإحداثيات $(X = -37.5, Y = 36.76)m$



الشكل (16): قيم تابع الهدف للرافعة البرجية (Liebherr 355 HC) عند الإحداثيات المثلى ($X = -37.5, Y = 36.76$).

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

1. أن النمذجة البصرية لموقع البناء ضمن بيئة الـ Revit BIM يسهل على المقاول إمكانية تحديد نقاط التزويد والتفريغ بصرياً على الرسم مع إمكانية تعديلها عند تشغيل الخوارزمية في كل مرة.
2. أعطى موقع الرافعة البرجية ($X = -46.87, Y = 34.14$)m المختار من قبل المقاول القيمة 7016.333 min لتابع الهدف بينما نجحت خوارزمية أسراب الطيور (PSO) في تحديد الإحداثيات المثلى لموقع الرافعة البرجية ($X = -44.68, Y = 45.6$)m والتي أعطت أقل قيمة 2026.65 min لتابع الهدف وهذا ما يؤكد تفوق خوارزمية التحسين في تقليل زمن سفر الرافعة بنسبة 28.88% عند تحديد الموقع الأمثل لها، كما وتعتبر هذه النسبة جيدة مقارنة مع بعض النتائج العالمية فقد بلغت هذه النسبة 12% باستخدام الخوارزميات الجينية.
3. تم تطوير الخوارزمية بإضافة الرافعة البرجية Liebherr 355 HC بطول ذراع $jib = 75$ وتم إيجاد الموقع الأمثل للرافعة البرجية ($X = -37.5, Y = 36.76$)m والتي أعطت أقل قيمة لتابع الهدف 5271 min، وخدمت جميع نقاط التزويد والتفريغ على اعتبار أن تكلفة استئجار وتشغيل رافعة واحدة Liebherr 355 HC أقل من تكلفة استئجار رافعتين لخدمة موقع البناء وهذا يقدم بديل آخر للمقاول في حالة عدم امتلاكه لأي من الرافعات البرجية.
4. إمكانية الاستفادة من الخوارزمية التي تم تكويدها بلغة الـ python ضمن الـ Dynamo في أبنية أخرى يتم نمذجتها ضمن الـ BIM بالإضافة إلى إمكانية طريق تطويرها لتناسب أنواع أخرى من الروافع البرجية ولعدد من الطوابق أعلى.

التوصيات:

1. تخلي شركات المقاولات عن الطرق التقليدية المتبعة أثناء تحديد موقع الرافعة، وتبني أساليب جديدة تعتمد على الذكاء الاصطناعي تقلل زمن سفر الرافعة وتخدم جميع نقاط التزويد والتفريغ.
2. تطوير النموذج المقترح بإضافة أنواع مختلفة من الروافع البرجية المتوفرة في السوق المحلية ولعدد مختلف من الطوابق مع واجهة تفاعلية تسمح للمتعهد بمعرفة الموقع المثالي لكل رافعة والمناطق التي تخدمها.
3. تطوير النموذج لإيجاد المواقع المثلى لعدة روافع تعمل معاً ضمن موقع البناء.

References:

1. Abdelmegid, M. A., K. M. Shawki, et al. (2015). "GA optimization model for solving tower crane location problem in construction sites." Alexandria Engineering Journal **54**(3): 519-526.
2. Alkriz, K. and J.-C. Mangin (2005). A new model for optimizing the location of cranes and construction facilities using genetic algorithms. Proceedings 21st Annual ARCOM Conference. London, UK: Springer.
3. H. Abdel-Khalek, K. S., M. Adel (2013). "A Computer-based Model for Optimizing the Location of Single Tower Crane in Construction Sites." International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT) **2**(2): 438-446.
5. Han, S., M. Al-Hussein, et al. (2012). Simulation of mobile crane operations in 3D space. Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE.
6. Kaveh, A. a. V., Y. (2018). "Optimization of Tower Crane Location and Material Quantity between Supply and Demand Points." Periodica Polytechnica Civil Engineering **62**(3): 732-745.
7. Kennedy, J. and R. Eberhart (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks, IEEE.
8. Li, R., Y. Fu, et al. (2018). An algorithm for optimizing the location of attached tower crane and material supply point with BIM. ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction, IAARC Publications.
9. Liebherr-Werk (2000). Liebherr 63 LC, Biberach an der Rib
10. Liebherr-Werk (2000). Liebherr 355 HC, Biberach an der Rib.
11. Lien, L.-C. and M.-Y. Cheng (2014). "Particle bee algorithm for tower crane layout with material quantity supply and demand optimization." Automation in Construction **45**: 25-32.
12. Omran, j. J., F. and Alhassan, B. (2018). "BIM model oriented for Maintenance Using Visual Programming & Knowledge Management." Tishreen University Journal-Engineering Sciences Series **40**(6).
13. Peurifoy, R. L., C. J. Schexnayder, et al. (2018). Construction planning, equipment, and methods, McGraw-Hill Education.
14. Shi, Y. (2004). "Particle swarm optimization." IEEE connections **2**(1): 8-13.
15. Tadesse, E. K. (2019). Tower crane location optimization for high rise buildings in the financial district of Addis Ababa. School of Civil & Environmental Engineering, Addis Ababa University, . **Master Thesis**,: 163.
16. Tam, V. W. and I. W. Fung (2011). "Tower crane safety in the construction industry: A Hong Kong study." Safety science **49**(2): 208-215.
17. Viswa Bharathy, A. and A. Mahabub Basha (2017). "A multi-class classification MCLP model with particle swarm optimization for network intrusion detection." Sādhanā **42**(5): 631-640.
18. Zhang, P., F. C. Harris, et al. (1999). "Location optimization for a group of tower cranes." Journal of construction engineering and management **125**(2): 115-122.